



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 198 00 844 A 1**

⑤ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**G 01 J 9/00**  
G 01 M 11/02

⑲ Aktenzeichen: 198 00 844.9  
⑳ Anmeldetag: 13. 1. 98  
㉑ Offenlegungstag: 15. 7. 99

**DE 198 00 844 A 1**

⑦① Anmelder:  
Schwider, Johannes, Prof. Dr., 91056 Erlangen, DE

⑦② Erfinder:  
gleich Anmelder

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Shack-Hartmann-Sensor mit orts-varianter Linsenanordnung

⑤⑦ Durch eine orts-variante Gestaltung der Linsenraster des Shack-Hartmann Sensors läßt sich ein Zuordnungsproblem beseitigen, welches entsteht, wenn die Wellenaberrationen so groß sind, daß der Fokusspot das Gebiet einer Subapertur verläßt. Bei einem gewöhnlichen Shack-Hartmann Sensor können dann Zuordnungsprobleme auftreten. Zur Signatur einer einzelnen Subapertur sind verschiedene Verfahren geeignet. Entweder man setzt unterschiedliche Spotcharakteristika ein oder man benutzt mehrere Matrixfelder unterschiedlicher Subaperturauswahl ein, um den Meßbereich weitgehend zu erweitern. Insbesondere kann auch an schaltbare Transparenzmasken von der Art einer LCD-Matrix gedacht werden, wodurch ein Höchstmaß an Freiheit bei der Signatur der Subaperturen durch geeignete Kodierung erzielt werden kann.

**DE 198 00 844 A 1**

## Beschreibung

Bei der Messung von Wellenfronten mittels Shack-Hartmann-Sensor treten bei größeren Wellenfrontneigungen Eindeutigkeitsprobleme auf, da dabei leicht der Bereich einer Subapertur der dazugehörigen Linse im Linsenfeld vom Fokusspot überschritten werden kann. Dadurch entstehen Zuordnungsprobleme. Durch Verkürzung der Fokuslänge bei konstantem Linsendurchmesser läßt sich zwar der Eindeutigkeitsbereich vergrößern. Dabei geht allerdings die erwünschte Empfindlichkeit verloren. Deshalb wird in dem vorliegenden Patent durch ein orts-variantes Linsenarray das Eindeutigkeitsproblem überwunden, ohne daß Genauigkeitseinbußen hingenommen werden müssen.

Orts-Varianz kann in das Linsenarray des Shack-Hartmann Sensors auf verschiedene Weise eingeführt werden. Es bieten sich dazu mehrere Methoden an:

- Vorschalten einer geeigneten Transparenz-Maske vor das Linsenraster
- Vorschalten einer zeitlich variablen Transparenzmaske in Form eines LCD-Modulators oder eines ferroelektrischen Modulators
- Vorschalten einer Polarisationsmaske zusammen mit einem drehbaren Polarisator vor dem CCD-Chip
- Vorschalten einer Farb-Kodiermaske zusammen mit Benutzung einer 3-Chip-Farb-CCD-Kamera
- Versehen der Einzellinsen mit astigmatischen Aberrationen deutlich unterscheidbarer Orientierung der Hauptachsen bei der Spotbestimmung.
- Bei der Verwendung von diffraktiven Linsen lassen sich sehr gut auch allgemeinere Spotbilder mit Mehrachsensymmetrie oder ähnlichen Merkmalen realisieren.

Die Philosophie hinter der Orts-Varianz besteht im Einführen einer Signatur für die einzelnen Linsen im Raster derart, daß nach der Detektion eine Spot/Subaperturzuordnung erfolgen kann. Dabei wird entweder von mehreren unterscheidbaren Helligkeitsstufen oder von mehreren Bildern mit unterschiedlichen und dazu aufgelockerten Arrays, beziehungsweise von speziell kodierten Linsenarrays ausgegangen. Es ergeben sich für die Kodierung eine Reihe von Möglichkeiten, die im Zusammenhang mit der software-Lösung für die Wellenfrontrekonstruktion gesehen werden müssen.

Je nach Dynamik des CCD-Arrays kann man mehrere Intensitätsstufen über einem Rauschpegel in der Spotebene unterscheiden. Das Anbringen einer Transparenzmaske ermöglicht die Zuordnung auch über einen Subaperturbereich hinaus.

Ein schaltbares Linsenarray kann durch die Kombination eines Linsenarrays mit einem binären LCD-Array in Reihenschaltung realisiert werden. Das LCD-Array dient dabei als zeitvariable Maske, die aus einem dichten Array von Linsenaperturen ein beliebig aufgelockertes Array erzeugen kann. Damit kann der Eindeutigkeitsbereich für den Fokusspot einer einzelnen Linse beliebig vergrößert werden. Um eine volle Auswertung zu erreichen, sind allerdings mehrere Spotbilder auszuwerten. Im Extremfall kann man daran denken, jede Linse allein auf Transparenz zu schalten bzw. ganze Zeilen oder Spalten zu verwenden. Sicherlich sind aber andere Kodierungen ebenso erfolgreich eindeutig auswertbar zu gestalten und damit der Aufwand an Einzelaufnahmen zu senken.

Eine alternative Methode könnte in der Aufprägung einer Linsensignatur bestehen. Angenommen, man verwendet Mikrolinsen mit astigmatischen Eigenschaften, dann ließe

sich die Hauptachsenlage zur Signatur heranziehen. Die Auswertesoftware kann dann aufgrund der Achsenlage eine Zuordnung zu einem Pupillengebiet vornehmen. Auf diesem Wege lassen sich eindeutige Zuordnungen zwischen den Spots auf dem CCD-Chip und Punkten in der Pupillenebene vornehmen. Damit wäre man von der strikten Fesselung an den Subaperturbereich einer Einzellinse des Arrays für die Ablagen der Spots befreit und auf diese Weise der Meßbereich des Shack-Hartmann Sensors erweitert in Richtung auf stärkere Aberrationen der zu messenden Wellenfronten. Durch Einführen einer Signatur läßt sich der Eindeutigkeitsbereich lateral beträchtlich erweitern. Wegen der begrenzten Anzahl von unterscheidbaren Signaturen muß das erweiterte Subaperturgebiet schließlich auch periodisch wiederholt werden mit dem Resultat, daß wiederum Mehrdeutigkeiten allerdings in vermindertem Maßstab auftreten können. Man hat dabei ohnehin zu berücksichtigen, daß bei sehr großen Ablagen des Spots relativ zur Linsenachse schließlich eine Verwaschung des Spots auftreten muß.

Der Shack-Hartmann Sensor kann sowohl mit refraktiven aber in einem beschränkten Wellenlängenbereich auch mit diffraktiven Linsenrastern betrieben werden. Diffraktive Linsen ermöglichen nun die sehr allgemeine Gestaltung von Punktbildern. Es ist dann eine Frage des Dynamikbereichs der Kamera, der Größe der zu messenden Aberrationen und der Software wie hoch die Anzahl unterscheidbarer Signaturen ist.

Auch der Polarisationsfreiheitsgrad läßt sich zur Signatur verwenden, allerdings kann auf diesem Wege nur ein Faktor 2 herausgeholt werden. Ohnehin müssen zwei Aufnahmen mit unterschiedlicher Polarisatorstellung vor dem CCD-Array benutzt werden. In der Linsenebene muß dann ein Schachbrett-Polarisator angeordnet werden, der die Signatur einführt und vor dem CCD-Chip wird ein um 90 Grad drehbarer Polarisator benötigt, um die beiden Zustände zu unterscheiden.

Mit einer 3-Chip-Farb-CCD-Kamera lassen sich noch weitere Freiheitsgrade in den SHS einbauen, wenn er mit weißem Licht und refraktiven Linsen betrieben wird.

## Ausführungsbeispiel

Die orts-variante Ausgestaltung des Shack-Hartmann Sensors soll an Hand eines Ausführungsbeispiels (s. Fig. 1) erörtert werden. Das zu untersuchende Wellenfeld fällt von links auf eine Kombination aus einer Liquid-Crystal-Matrix mit einzeln ansteuerbaren Subaperturen und einem angepaßten Mikrolinsenraster, wobei jede Subapertur der LCD-Matrix mit einer Linse des Rasters koinzidiert. In der Fokalebene des Linsenrasters ist ein CCD-Chip ausreichender Pixelanzahl angeordnet, welcher zur Detektion der Spotintensitäten herangezogen werden kann. Die LCD-Matrix wird von einem PC derart gesteuert, daß nacheinander unterschiedliche Rasterfelder zu einem Feld von Spotbildern führen, wobei die Subaperturen vom PC vorgegeben werden und damit bekannt sind. Dies wird zur eindeutigen Zuordnung Spot/Subapertur via Software genutzt.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Wellenfrontmessung mit Hilfe eines Shack-Hartmann Sensors, **dadurch gekennzeichnet**, daß das refraktive und/oder diffraktive Linsenraster vor dem zugehörigen CCD-Sensor durch Zusatzmaßnahmen orts-variant ausgelegt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Linsenraster mit einer Transparenzmaske in Reihe geschaltet wird und die Transparenz orts-variant

riant eingestellt wird zur Erreichung einer Ortssignatur.

3. Verfahren nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Transparenzmaske durch eine schaltbare LCD- bzw. ferroelektrische Matrix realisiert wird, wobei beliebige Ansteuerbarkeit und Anpassung an das Linsenraster gegeben sei. 5

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß vor das Linsenraster eine Polarisationsmaske mit abwechselnd orthogonal polarisierenden Bereichen mit angepaßten Rasterdimensionen geschaltet wird und vor dem CCD-Chip eine drehbare Analysator-Folie zur Aufnahme orthogonal kodierter Spotbilder angeordnet wird. 10

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß vor das Linsenraster ein 3-Farbenfilter in Rasterform angeordnet wird und daß eine 3 Chip-Kamera zur Spotdetektion der farblich unterschiedlichen Spots benutzt wird. 15

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das refraktive Linsenraster im Herstellungsprozeß derart ausgelegt wird, daß sich zumindest benachbarte Subaperturen in den Spotaberrationen unterscheiden, wodurch sich eine Zuordnung zwischen Pupillen- und Spotpositionen ausführen läßt. 20

7. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß ein diffraktives Linsenraster beim Design mit zur Signatur geeigneten Aberrations- oder allgemeiner Spotfunktionen versehen wird. 25

8. Verfahren nach Anspruch 1-7, dadurch gekennzeichnet, daß gleichzeitig auch Kombinationen verschiedener Methoden zur Signatur der Spots genutzt werden. 30

---

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

---

35

40

45

50

55

60

65

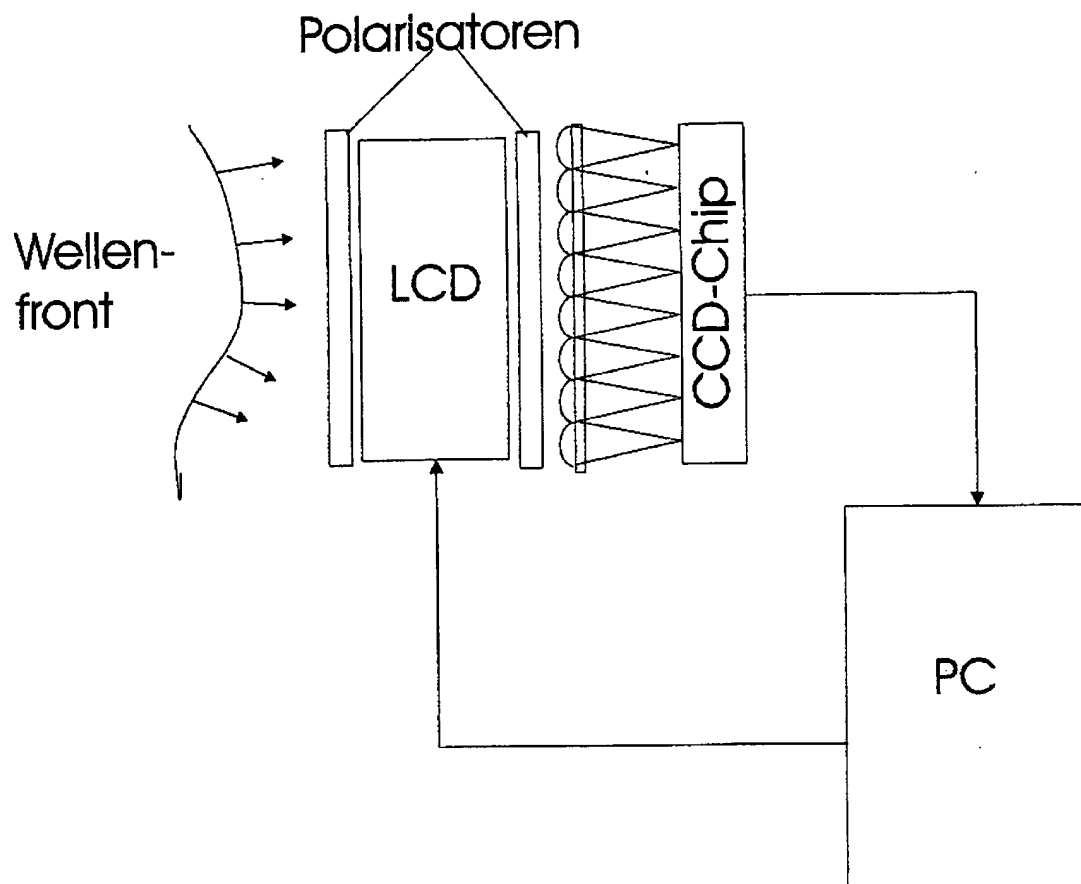


Fig. 1